

# 전달경계를 이용한 댐-호소 계의 지진응답해석

## Seismic Response Analysis of Dam-Reservoir System Using Transmitting Boundary

김재관\*      조정래\*\*  
Kim, Jae Kwan      Cho, Jeong Rae

### 국문요약

댐-호소 계의 지진응답 해석에 있어서의 어려운 문제 중 하나는 댐 상류방향으로의 에너지 방사를 적절하게 처리하는 것이다. 본 논문에서는 깊이가 일정한 호소 원역으로의 에너지의 방사를 잘 모델링할 수 있는 전달경계를 제시하였다. 개발된 방법에서 수면파의 영향을 고려하였으며, 호소-지반의 상호작용을 근사적으로 표현할 수 있는 흡수경계조건도 도입하였다. 댐과 호소의 경계면이 지표면에 수직하고 호소의 깊이가 일정할 경우에는, 제안된 전달경계를 댐체의 모델에 직접 연결할 수 있다. 댐체는 선형탄성거동을 가정하여 유한요소로 모델링하였다. 얻어진 댐-호소 계의 운동방정식을 이용하여 댐의 지진응답특성을 조사하였다.

**주요어** : 댐, 호소, 지진해석, 전달경계, 수면파, 흡수경계조건

### ABSTRACT

One of the major difficulties in the seismic analysis of a dam-reservoir system is the treatment of the energy radiation in the upstream direction of the reservoir. In this paper, a new transmitting boundary is presented that can model properly the radiation of energy in the far field direction of a semi-infinite reservoir with constant depth. In the newly developed method, effects of surface wave motion are taken into account and the reservoir-foundation interaction is approximately accounted for with an absorbing boundary condition. If a dam has vertical upstream face and the infinitely long reservoir maintains constant depth, then the proposed transmitting boundary can be directly coupled with the model of dam body. In present study, the dam body is assumed to behave elastically and modeled by finite element method. Seismic responses of a dam model are investigated using the newly developed transmitting boundary.

**Key words** : dam, reservoir, seismic analysis, transmitting boundary, water surface wave, absorbing boundary condition

## 1. 서 론

댐의 파괴는 대규모 인명 손실과 재산 피해를 초래할 수 있을 뿐 아니라 장기적으로 심각한 경제적 지장을 가져올 수 있다. 그러므로 댐은 지진에 대해서도 일반적인 구조물 보다는 한층 높은 수준의 안전성을 보장할 수 있도록 설계되고 유지되어야 한다.<sup>(1)</sup> 댐은 일반

구조물과 달리 댐체와 호소간의 상호작용에 의해서 큰 영향을 받는다. 그러므로 유체-구조물 상호작용이 댐의 내진설계에 반드시 고려되어야 하고 고려되고 있다.<sup>(1)</sup>

콘크리트 중력댐의 지진해석에 관한 연구의 초기에는 댐체를 강체 지반에 고정된 강체 구조물로 가정하고 지진하중 작용 시 호소와 댐 경계면에 발생하는 동수압력을 산출하는 연구가 수행되었다.<sup>(2)</sup> 간단한 형상의 호소와 댐 경계면에 작용하는 동수압력에 관한 해석해가 유도되었으며<sup>(2),(3)</sup>, 복잡한 형상의 호소의 경우에는 유한요소나 경계요소<sup>(4),(5)</sup>가 동수압력 계

\* 정회원 · 서울대학교 공과대학 토목공학과 부교수

\*\* 정회원 · 대본엔지니어링 구조부

본 논문에 대한 토의를 6월 30일까지 학회로 보내주시면 그 결과를 보내드리겠습니다.

산에 사용되고 있다.

또한 댐체의 유연성이 콘크리트 중력댐의 지진응답에 미치는 영향을 고려하는 방향으로 많은 연구가 이루어져 왔다. 댐체의 유연성을 고려하는 댐-호소 계의 지진응답 해석에는 부분구조법의 사용이 보편화되어 있다. 이 방법에서는 댐체는 주로 유한요소로, 호소는 유한요소<sup>(6),(7),(8)</sup> 또는 경계요소<sup>(9)</sup>로 모델링하고 접촉면에서의 적합조건과 평형조건을 부과함으로써 댐-호소 계의 운동 방정식을 얻는다.

지반의 유연성이 호소수의 동적 거동에 미치는 영향의 중요성이 인식되어 이를 고려한 해석법이 개발되어왔다. 여기에는 흡수경계조건을 이용하여 호소-지반상호작용을 근사적으로 고려하는 방법과<sup>(5),(6),(7)</sup>와 지반의 초유한요소<sup>(8)</sup>를 이용하여 엄밀하게 모델링하는 방법이 있다.

최근에는 댐 체와 댐 기초의 비선형 거동특성을 밝히려는 연구가 활발하게 진행되고 있고, 이를 위한 시간 영역 해석 기법이 개발되고 있다.<sup>(9),(10)</sup>

댐의 지진응답 해석에서 어려운 문제는 호소 영역의 처리이다. 실제 호소의 길이는 유한하나 댐 체의 폭과 높이에 비하여 길기 때문에, 유한한 모델을 사용하면 모델이 지나치게 커지는 문제가 발생한다. 따라서 일반적으로 그림 1에서와 같이 상류측으로 무한한 길이를 갖는 모델이 널리 사용되고 있다. 이 경우에는 댐 상류방향으로 무한한 호소의 원역으로 에너지의 방사가 적절하게 처리하여야 하는 문제가 생긴다.<sup>(7),(8),(9)</sup>

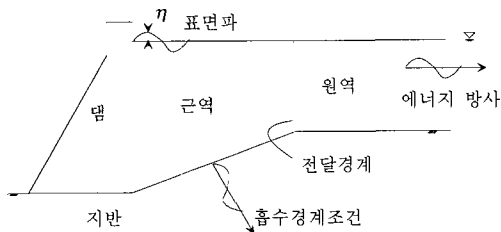


그림 1 댐-호소수 계

본 연구에서는 호소를 깊이가 일정한 반무한체로 가정하고서 표면파의 영향을 고려할 수 있고 호소의 동적 응답에 미치는 지반 유연성의 영향도 근사적으로 고려할 수 있는 2차원 전달경계<sup>(6)</sup>를 개발하였다. 개발된 전달경계는 콘크리트 중력댐의 지진응답해석에 바로 적용될 수 있다. 댐과 호소간의 경계면이 지표면에 수직하고 호소의 깊이가 일정하면, 제안된 전달경계는 댐체의 모델에 직접 연결될 수 있다. 그렇지 않을 경우에는 근역은 경계요소로 모델링하고 원역과의 경계에 원역으로 에너지를 전달하는 전달경계를 설정하여 임의형상의 댐-호소계의 지진응답을 해석할 수 있다.

개발된 전달경계를 상류면이 수직한 댐에 적용하여 그 응답특성을 조사하였다. 댐체는 선형탄성거동을 가정하여 유한요소로 모델링하였고, 호소는 댐의 상류면에 설정된 전달경계에 의하여 처리하였다. 유연한 댐체와 호소간의 상호작용, 수면파 및 지반의 유연성 등이 댐의 지진응답에 미치는 영향을 알아 보았다.

## 2. 전달경계의 유도

### 2.1 유체의 지배방정식

댐과 같이 담고 있는 물이 깊은 경우에는 동압력을 계산할 때는 물의 압축성을 고려해야 할 필요가 있다.<sup>(2)</sup> 비점성 압축성 이상유체에 대한 지배방정식은 동압력에 대한 파동 방정식으로 다음과 같이 주어진다.<sup>(2),(3)</sup>

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (1a)$$

$$\frac{\partial^2 u^t}{\partial^2} = -\frac{1}{\rho \partial x} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1b)$$

$$\frac{\partial^2 v^t}{\partial^2} = -\frac{1}{\rho \partial y} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (1c)$$

여기서  $p = p(x, y, t)$ 는 동수압력;  $c$ 는 물속에

서의 소리의 속도로 알려진, 압력파의 전파속도;  $u'=u'(x,y,t)$ 와  $v'=v'(x,y,t)$ 는 각각 유체 입자의 수평, 수직 방향 전변위를 나타낸다. 조화운동을 가정하면 식 (1a)는 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (2)$$

위에서  $p = p(x,y,\omega)$ 는 주파수영역에서의 동수 압력  $\omega$ 는 주파수;  $k$ 는  $k=\omega/c$ 로 정의되는 파수(wave number)이다.

탄성파가 매질 내에서 전파될 때, 내부 마찰에 의해 에너지가 소산된다. 이러한 재료 감쇠는 주파수 영역에서 파의 전파속도  $c$ 를 복소수로 만들어 줌으로써 고려할 수 있다.<sup>(11)</sup> 본 연구에서는 K. Aki 와 P. G. Richard<sup>(12)</sup>에 의해 제안된 다음 식을 사용하였다.

$$c = \frac{c_0}{(1 - \frac{1}{\pi Q} \ln \frac{\omega}{2\pi})(1 - \frac{1}{2Q})}$$

위에서  $c_0$ 는 파의 실제 전파 속도이고,  $Q$ 는 매질의 quality factor 이다. 점성 감쇠를 가진 1 자유도계와 비교하면, 감쇠비,  $\xi_w$ 와  $Q$ 와의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\xi_w = \frac{1}{2Q}$$

## 2.2 고유값 문제

일정한 깊이를 갖고서 수평방향으로 무한하게 연장되는 호소의 수면에서의 경계조건을 다음과 같다.

$$p = \rho_w g \eta \quad (3a)$$

그리고

$$\ddot{\eta} = -\frac{1}{\rho_w} q \quad (3b)$$

위에서  $q$ 는  $\partial p / \partial n$ 으로 정의되는 동압력의 flux;  $n$ 은 외향 법선벡터;  $\eta$ 는 수면으로부터의 수면파의 높이;  $\rho_w$ 는 유체의 밀도; 그리고  $g$ 는 중력가속도를 의미한다. 식 (3a, b)에서  $\eta$ 를 소거하면 다음의 잘 알려진 선형자유수면 조건 (linearized free surface condition) 이 계산된다.

$$q = -\frac{1}{g} \ddot{p} \quad (4)$$

만약, 수면파의 영향을 무시하면, 수면에서  $p=0$ 으로 경계조건을 부과할 수 있다. 식 (4)를 주파수 영역으로 변환하면, 다음과 같다.

$$q(x,H,\omega) = \frac{\omega^2}{g} p(x,H,\omega) \quad (5)$$

호소의 바닥면에서는 호소와 지반의 상호작용을 근사적으로 고려하기 위해서 흡수경계조건을 다음과 같이 부과한다.<sup>(5),(6),(7)</sup>

$$q(x,0,\omega) - \rho a_n(x,0,\omega) - i\omega\gamma p(x,0,\omega) \quad (6)$$

위에서  $\rho$ 는 물의 밀도;  $a_n$ 은 경계에서의 연직 가속도로 여기에서 0이다.  $\gamma$ 는 다음과 같이 정의되는 값이다.

$$\gamma = \frac{11 - \alpha}{c1 + \alpha}$$

위에서,

$$\alpha = \frac{(c_r \rho_r / c\rho) - 1}{(c_r \rho_r / c\rho) + 1}$$

$\alpha$ 는 파의 반사계수;  $c_r$ 와  $\rho_r$ 는 지반의 P파 속도와 밀도;  $c$ 와  $\rho$ 는 각각 물속에서의 소리의 속도와 물의 밀도이다.  $\alpha$ 는 0부터 1까지의 값을 가지며, 1일 때는 호소-지반의 상호작용을 무시하는 강체 지반을 의미하고, 0일때 호소에서 바닥으로의 모든 압력파가 바닥으로 흡수됨을 의미한다.

경계조건 (5)와 (6)를 만족하는 미분방정식 (2)의 해는 변수분리법에 의해서 다음과 같은 형태의 해의 선형조합으로 표현할 수 있다:

$$p(x, y) = p_x(x)p_y(y) \quad (7)$$

식 (7)에 경계조건을 대입하면 다음과 같은 고유값 문제가 구성된다.

$$\frac{d^2 p_y}{dy^2} + \lambda^2 p_y = 0 \quad (8)$$

$$p_y(H) = 0, \text{ 또는 } p_y(H) = \frac{g}{\omega^2} \frac{dp_y}{dy}(H) \quad (9)$$

$$\frac{dp_y}{dy}(0) = i\omega \eta p_y(0) \quad (10)$$

여기서  $\lambda$ 는 고유값이고,  $p_y(y)$ 는 대응하는 고유함수이다. 또한  $p_x(x)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$p_x(x) = \exp(-x\sqrt{\lambda^2 - k^2}) \quad (11)$$

수면파의 영향과 흡수경계조건을 무시할 경우, 위의 고유값과 고유함수를 직접적으로 구할 수 있지만<sup>(13),(14)</sup>, 그렇지 않은 경우에는 복소수 고유값 문제가 되어 풀기 어렵다. 이 연구에서는 유한요소법을 사용하여 고유값 문제의 근사적인 해를 구하였다.<sup>(6)</sup> 전달경계가 설정되는 호소의 수직단면을 그림 2에서와 같이 이산화하였다. 식 (8)에 대해 가중잔차법을 다음과 같이 적용한다.

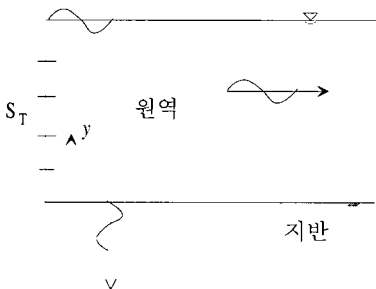


그림 2 1차원 유한요소의 적용

$$\int_{S_r} \left( \frac{d^2 p_y}{dy^2} + \lambda^2 p_y \right) \delta p_y dy = 0$$

여기에 부분적분을 시행하면, 다음이 얻어진다.

$$\int_{S_r} \left( \frac{dp_y}{dy} \cdot \frac{d\delta p_y}{dy} \right) dy - \lambda^2 \int_{S_r} (p_y \cdot \delta p_y) dy = \delta p_y \cdot \frac{dp_y}{dy} \Big|_{y=0}^{y=H} \quad (12)$$

형상함수를 도입해  $p_y(y)$ 와 그 미분은 절점 압력 벡터,  $\mathbf{p}_y^e$ 로 부터 다음과 같이 구해진다.

$$p_y(y) = \mathbf{N}(y)\mathbf{p}_y^e \quad (13)$$

$$\frac{dp_y}{dy}(y) = \frac{d\mathbf{N}(y)}{dy} \mathbf{p}_y^e \equiv \mathbf{B}\mathbf{p}_y^e \quad (14)$$

여기서  $\mathbf{N}$ 은 형상함수이다. 식 (13)과 (14)를 식 (12)에 대입하면 다음 방정식이 얻어진다.

$$[\mathbf{G} + \mathbf{A} - \lambda^2 \mathbf{T}] \mathbf{p}_y^e = \mathbf{0} \quad (15)$$

여기서,

$$\mathbf{G} = \int_{S_r} \mathbf{B}^T \mathbf{B} dy$$

$$\mathbf{T} = \int_{S_r} \mathbf{N}^T \mathbf{N} dy$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} i\omega\eta & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -\omega^2/g \end{bmatrix}$$

식 (15)은 고유값 문제를 나타내는 대수 방정식이고, 이로부터 고유벡터 및 그에 대응하는 고유값을 구할 수 있다. 수면파의 영향을 무시할 경우에는 수면에 설정된 절점에 대응하는 행과 열, 즉, 마지막 행과 열을 삭제하면 된다.

### 2.3 전달경계의 동적강성행렬

식 (7), (11), (15) 로부터 동수압력 벡터,  $\mathbf{p}$  과 그 flux 벡터,  $\mathbf{q}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{p} = \Psi T \quad (16)$$

$$\mathbf{q} = \left\{ \frac{\partial p}{\partial n} \right\} = \Psi \mathbf{K} \Gamma \quad (17)$$

여기서,  $\Psi$ 는 식 (15)에서 계산되는 고유벡터로 구성되는 행렬;  $\Gamma$ 는 참여계수벡터;  $\mathbf{K}$ 는 대각행렬로서 다음과 같다.

$$diagonal(\mathbf{K}) = \left[ \sqrt{\lambda_1^2 - k^2} \quad \sqrt{\lambda_2^2 - k^2} \quad \dots \quad \sqrt{\lambda_n^2 - k^2} \right]$$

식 (2) 와 (16) 및 (17) 로부터 전달경계면  $S_T$  상의 수평 절점변위 벡터와, 수평 표면력 벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{u}'_T = -\frac{1}{\rho\omega^2} \Psi \mathbf{K} \Gamma \quad (18)$$

$$\mathbf{t}_T = \Psi \Gamma \quad (19)$$

근역에서 유한요소나 경계요소법을 적용하고, 이 때 사용된 형상함수가 전달경계유도시 사용되는 형상함수와 동일하다고 가정하면, 전달 경계에서의 전수평변위와 traction은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\mathbf{u}'(y) = \mathbf{N}(y)\mathbf{u}'_T$$

$$\mathbf{t}(y) = \mathbf{N}(y)\mathbf{t}_T$$

가상절점 (변위를 통한 절점력 벡터,  $\mathbf{f}_T^F$ 에 의한 가상일)은 다음과 같이 표현된다.

$$\delta \mathbf{u}'_T{}^T \mathbf{f}_T^F = \int_{S_T} \delta \mathbf{u}'^T(y) \mathbf{t}(y) dy = \delta \mathbf{u}'_T{}^T \int_{S_T} \mathbf{N}^T \mathbf{N} dy \mathbf{t}_T$$

따라서, 등가의 절점력 벡터는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{f}_T^F = \mathbf{T} \mathbf{t}_T = \mathbf{T} \Psi \Gamma$$

고유 행렬  $\Psi$ 는 직교성을 이용해 행렬  $\mathbf{T}$ 에 대해 정규화할 수 있다.

$$\Psi^T \mathbf{T} \Psi = \mathbf{I} \quad (20)$$

식 (18), (19), (20) 로부터 다음과 같은 원역에 대한 운동방정식을 구할 수 있다.

$$\mathbf{f}_T^F = -\rho\omega^2 \mathbf{T} \Psi \mathbf{K}^{-1} \Psi^T \mathbf{T} \mathbf{u}'_T = \mathbf{D}^F \mathbf{u}'_T \quad (21)$$

위에서,  $\mathbf{D}^F$ 는 원역에서의 동적강성행렬이고 대칭행렬이다.

### 3. 댐-호소 계의 운동방정식

앞에서 유도된 전달경계는 댐-호소 계의 형상이 그림 3과 같이 간단할 경우 평형조건과 적합조건을 이용해 댐의 운동방정식과 직접 결합될 수 있다. 댐체는 유한요소로 모델링하였고, 그 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D}_{oo} & \mathbf{D}_{oi} \\ \mathbf{D}_{io} & \mathbf{D}_{ii} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_o \\ \mathbf{u}_i \end{Bmatrix} = \omega^2 \mathbf{M} \mathbf{r} u_g + \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{f}_i^S \end{Bmatrix} \quad (22)$$

여기서 아래첨자  $I$ 는 댐과 호소의 접촉면을,  $O$ 는 그 외의 자유도를 의미하며,  $\mathbf{f}_i^S(\omega)$ 는 외력 벡터;  $\mathbf{u}(\omega)$ 는 진동수영역에서의 상대변위 벡터;  $\mathbf{r}$ 은 지진영향계수벡터;  $u_g(\omega)$ 는 지반운동을 의미한다. 전변위는 상대변위에 지반변위의 함으로 다음과 같이 정의된다:

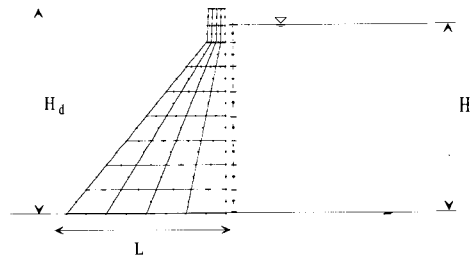


그림 3 해석 대상 댐 모델 (미 Pine flat dam)

$$\mathbf{u}'_T = \mathbf{u}_T + \mathbf{r}u_g \quad (23)$$

댐체의 동적강성행렬  $\mathbf{D}(\omega)$  계산시 이력감쇠가 가정하였고, 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{D}(\omega) = -\omega^2 \mathbf{M} + (1 + 2i\xi_d) \mathbf{K}$$

여기서  $\xi_d$ 는 이력감쇠비;  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{K}$ 는 각각 질량과 강성행렬이다.

식 (21)과 (22)이 전달경계면  $S_1$ 에서 만족하는 적합조건 및 경계조건은 다음과 같다.

$$\mathbf{u}_I = \mathbf{u}_T$$

$$\mathbf{f}_I^S + \mathbf{f}_T^F = \mathbf{0}$$

적합조건과 경계조건을 이용해 연결된 계의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D}_{OO} & \mathbf{D}_{OI} \\ \mathbf{D}_{IO} & \mathbf{D}_{II} + \mathbf{D}^F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_O \\ \mathbf{u}_I \end{Bmatrix} = \omega^2 \mathbf{M} \mathbf{r} u_g - \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{D}^F \end{Bmatrix} \mathbf{r} u_g \quad (24)$$

## 4. 해석 예제

### 4.1 해석 대상 댐 모델

개발된 전달경계를 검증하고, 댐의 지진응답에 대한 유체-구조물 상호작용의 영향을 보기 위해 그 형상이 그림 3에 주어진 댐의 지진응답을 해석하였다. 입력지반운동은 그림 4에 주어진 El Centro 지진기록(1940년, N-S 방향, PGA=0.319g)이 사용되었다. 댐체는 2차원 사변형 유한요소로 모델링되었고, 평면변형상태를 가정하였다. 댐의 치수와 물성값은 다음과

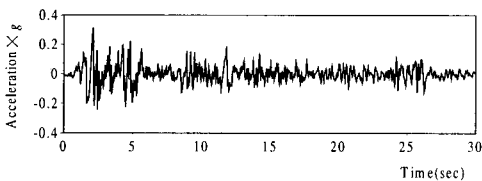


그림 4 지반운동 (40년 El Centro 지진, 남북방향, PGA=0.319g)

같다. 댐의 높이,  $H_d=120\text{m}$ ; 댐의 너비,  $L=96\text{m}$ ; 호소의 깊이  $H=H_d$ ; 댐체의 탄성계수,  $E=3.445 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ; 콘크리트의 밀도,  $\rho_c=2480\text{kg/m}^3$ ; 콘크리트의 포아송비,  $\nu=0.2$ ; 댐체의 이력감쇠비,  $\xi_d=5\%$  (단, 그림 9와 표1은 5% 및 3%를 비교).

### 4.2 댐-호소상호작용의 영향

유체-구조물 상호작용이 전체 응답에 미치는 영향을 알아 보기 위해, 유체-구조물 상호작용이 배제된 (Excluded) 경우와 이를 고려한 (Included) 경우를 비교하였다. 상호작용이 배제되었다는 것은 동압력 계산시 댐체를 강체로 가정하고, 동압력은 단지 유연한 댐체에 외력으로서만 작용한다는 것을 의미한다. 수식으로 살펴보면, 동압력 산정시 댐체를 강체로 가정하므로, 식 (21)과 전체 운동방정식 (24)는 다음과 같이 바뀐다.

$$\mathbf{f}_T^F = \mathbf{D}^F \mathbf{r} u_g \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D}_{OO} & \mathbf{D}_{OI} \\ \mathbf{D}_{IO} & \mathbf{D}_{II} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_O \\ \mathbf{u}_I \end{Bmatrix} = \omega^2 \mathbf{M} \mathbf{r} u_g - \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{D}^F \end{Bmatrix} \mathbf{r} u_g \quad (26)$$

즉, 동압력은 외부하중으로만 작용된다. 하지만 상호작용을 고려할 경우 외부하중 뿐만 아니라 전체 역학계의 강성행렬의 변화를 가져오므로 추가적인 질량의 영향으로 고유진동수가 낮아지게 된다.

그림 5에서는 댐 마루에서의 수평상대변위의

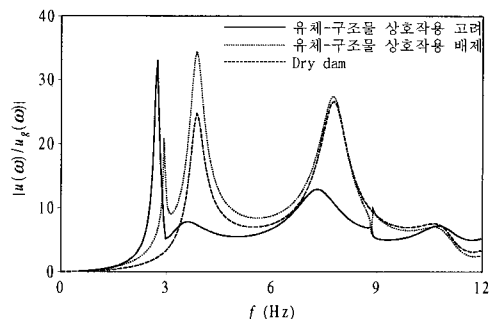


그림 5 댐 마루에서의 상대수평변위

전달함수를 비교하였다. Excluded 모델은 Dry 댐과 비교하여 고유주기가 동일하나 Included 모델의 고유주기는 예상대로 길어짐을 확인할 수 있다. 그림 6에서는 댐에 작용하는 동수압의 합에 대한 전달함수를 비교하였다. 동수압의 합은 정수압의 합력에 대하여 정규화 되었다. 여기서 고유주기의 변화를 확인할 수 있으며 최대값의 크기도 달라짐을 볼 수 있다.

댐체에 발생하는 바닥 전단력과 앞 부리에 대한 전도모멘트의 시간이력을 역푸리에 변환 (inverse Fourier transform)을 통해 계산하여 그림 7과 8에 각각 도시하였다. 바닥 전단력은 정수압의 합력에 대하여, 전도모멘트는 정수압에 의한 전도모멘트에 대하여 각각 정규화 하였다. 그림 7과 8에서 상호작용을 고려하지 않은 모델이 상호작용을 고려한 모델보다 초기에는 지진응답을 크게 평가함을 알 수 있다. 그러나 뒤늦은 시간에는 그 반대이다. 또한 동수압의 합력이 최대가 되는 시간에 동수압의 분포를 도시한 그림 9와 합력과 댐 저면에서 높이 112m의 댐체 단면이 급격히 변화는 점에서 압력의 비를 계산한 표 1로부터 상호작용을 고려한 모델이 합력뿐만 아니라 국부적

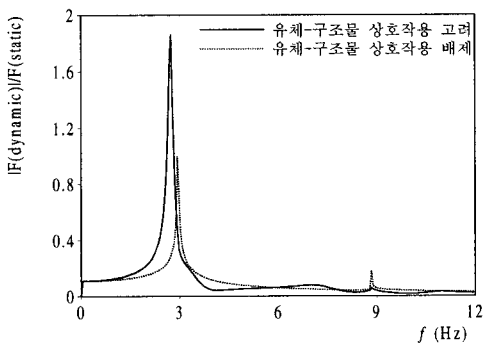


그림 6 벽체 벽면에 작용하는 동수압의 합력

인 영향도 큼을 보여주고 있다. 위의 결과는 댐의 지진응답을 정확하게 평가하기 위해서는 유연한 댐체와 호소와의 상호 작용이 반드시 고려되어야 한다는 것을 단적으로 보여주고 있다고 할 수 있다.

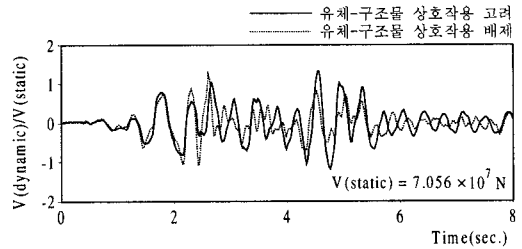


그림 7 댐체 바닥면 전단력의 시간이력그림

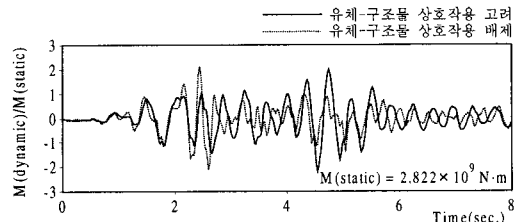


그림 8 댐 앞부리(toe)에 대한 전도모멘트의 시간이력

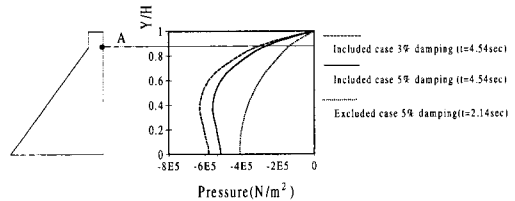


그림 9 최대 합력이 발생할 때의 동압력 분포

### 4.3 댐체의 감쇠비의 영향

댐체의 이력감쇠비가 미치는 영향을 알아보기 위해 3% 와 5% 의 이력 감쇠비를 적용하

표 1 최대 합력이 발생할 때의 합력 및 국부적인 압력(절대값 기준)

구 분	Excluded Model 5% Damping	Included Model 5% Damping	Included Model 3% Damping
합력 (F)	$2.71 \times 10^7$ N	$5.55 \times 10^7$ N	$6.29 \times 10^7$ N
A점에서의 동압력 (p)	$1.24 \times 10^5$ Pa	$3.22 \times 10^5$ Pa	$3.68 \times 10^5$ Pa
동압력/합력(p/F)	0.00458	0.00580	0.00585

였다. 그림 9 와 표 1에서 감쇠비가 5%에서 3%로 감소할 경우 합력이 감쇠비 감소에 따라  $5.55 \times 10^7 \text{N}$ 에서  $6.29 \times 10^7 \text{N}$ 으로 13.3%나 증가한다. 하지만 합력에 대한 A점의 압력의 비는 차이가 거의 없는 것을 보여주고 있다. 지반운동의 세기에 따라서 감쇠비가 변화하는 것이 일반적이므로 우리나라와 같은 중약진 지역에서는 지진응답해석에서 특히 감쇠비의 선정에 주의하여야 할 필요가 있다.

#### 4.4 수면파의 영향

댐의 안전에 대한 수면파의 영향은 두가지로 구분된다. 첫째는 수면파로 인하여 발생하는 동압력이 댐체에 추가로 가하여지는 것이고, 두 번째는 수면파로 인하여 수면이 상승하여 월류하거나 수리제어시설에 손상을 초래할 수 있다. 일반적으로 댐과 같은 거대 구조물의 지진 응답에 대한 수면파의 영향을 무시할 수 있다고 알려져 있다.<sup>(3),(8)</sup> 그러나 수면 상승으로 인한 영향은 고려되어야 하는 것으로 알려져 있다.

개발된 전달경계는 수면파의 영향을 고려할 수 있다. 그림 10에는 댐체에 작용하는 동압력의 합의 전달함수가 비교하였는데, 그 차이가 없음을 보여주고 있다. 이 결과는 댐체의 구조적 안전성 측면에서는 수면파의 영향이 고려되지 않아도 좋다는 것을 뒷받침하고 있다. 현재 개발된 전달경계는 수면파가 동수압에 미치는 영향을 고려할 수 있지만, 그 자체로

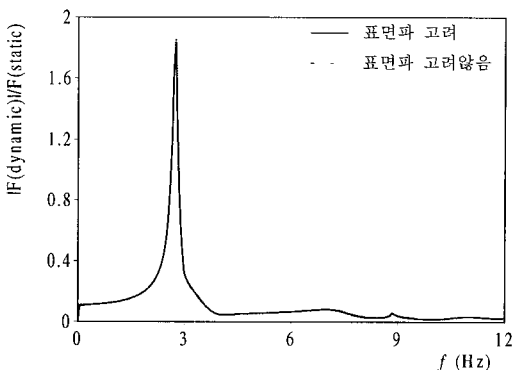


그림 10 댐체 벽면에 작용하는 동수압의 합력

정확한 수면 상승 높이를 계산할 수 없다. 따라서 이를 정확히 계산하려면 경계요소법 등을 도입해 호소의 일정 영역을 모델링할 필요가 있다.

#### 4.5 호소수-지반 상호작용의 영향

호소수-지반 상호작용은 흡수경계조건을 사용함으로써 근사적으로 고려되었다. 그림 11에는 파의 반사계수,  $\alpha$  값에 변화 따른 응답의 변화를 도시하였다.  $\alpha$ 가 1일 때, 지반으로의 동압력의 입사파는 완전히 반사되고, 다시 말해 바닥이 강체인 경우와 같다.  $\alpha$ 가 0이면, 입사파는 완전히 투과된다. 그림 11에서 알 수 있듯이  $\alpha$ 의 값이 0에 가까울수록, 다시 말해 지반이 연약할 수록 상호작용효과가 커짐을 알 수 있다.

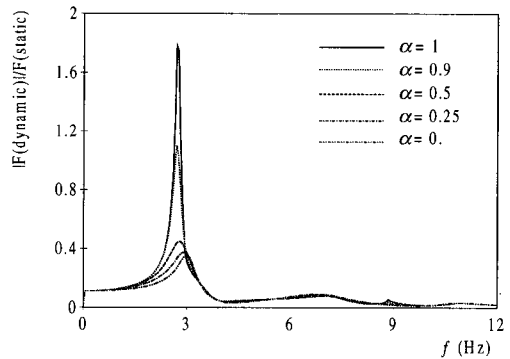


그림 11 댐체 벽면에 작용하는 동수압의 합력

### 5. 결 론

댐-호소 계의 지진응답해석시 무한영역으로의 에너지의 방사를 처리할 수 있는 전달경계를 개발하였다. 개발된 전달경계는 표면파의 영향을 고려할 수 있고, 호소수-지반의 상호작용을 근사적으로 다룰 수 있다.

댐과 호소의 경계가 수직이고 호소가 일정한 깊이로 무한히 연장될 때, 전달경계와 댐체의 운동방정식을 결합하여, 댐-호소수 계의 운동방정식을 도출하였다. 지진 응답 해석 시 댐



-호소수의 상호작용을 고려한 것과 그렇지 않은 것은 상당한 응답 특성의 차이를 나타내므로, 상호작용은 반드시 고려되어야 한다. 표면파의 영향은 구조적 안전성에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 계산되었으나, 호소수-지반의 상호작용해석은 지진응답에 상당한 영향을 준다.

### 감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가 연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술 개발사업으로 수행된 것이다.

### 참고 문헌

1. 건설교통부, 내진설계기준연구(II), 1997.
2. Westergaard, H. M., "Water pressures on dams during earthquakes," *Transaction, ASCE*, Vol. 98, 1933, pp. 418-433.
3. Chopra, A. K., "Hydrodynamic pressure in dams during earthquake," *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 93, No. EM6, Proc. Paper 5695, Dec., 1967, pp. 205-223.
4. Hanna, Y. G. and Humar, J. L., "Boundary element analysis of fluid domain," *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 108, 1982, pp. 436-449.
5. Humar, J. L. and Jablonski, A. M., "Boundary element reservoir model for seismic analysis of gravity dams," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 16, 1988, pp. 1129-1156.
6. Hall, J. F. and Chopra, A. K., "Hydrodynamic effects in the dynamic response of concrete gravity dams," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, 1982, pp. 333-345.
7. Hall, J. F. and Chopra, A. K., "Two-dimensional dynamic analysis of concrete gravity and embankment dams including hydrodynamic effects," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, 1982, pp. 305-332.
8. Lofti, V., "Analysis of the response of dams to earthquake," *Geotechnical Engineering Report GR86-2*, The University of Texas at Austin, 1986.
9. Wepf, D. H., Wolf, J. P., and Bachmann, H., "Hydrodynamic-stiffness matrix based on boundary elements for time-domain dam-reservoir-soil analysis," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 16, 1988, pp. 416-432.
10. Von Estorff, O. and Antes, H., "On fem-bem coupling for fluid-structure interaction analyses in the time domain," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 31, 1991, pp. 1151-1168.
11. Kim, J. K., "Application of the Boundary Element Method to Elastic Wave Scattering Problems," Ph.D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, 1990.
12. Aki, K. and Richards, P. G., *Quantitative Seismology, Theory and Mechanics*, McGraw-Hill, London, 1981.
13. 조정래, "유연한 댐 체와 압축성 유체의 상호작용을 고려한 대-호소 시스템의 지진응답 해석", 석사학위논문, 서울대학교, 1998.
14. 김재관, 조정래, "전달경계를 사용한 댐-호소수 계 지진응답해석", 98학술발표회 논문집, 한국지진공학회, 1998, pp. 155-162.
15. NRC, *Earthquake Engineering for Concrete Dams: Design, Performance and Research Needs*, National Academy Press, 1990.